

OPTIMIZACIÓN INFORMADA EN EL RIESGO DE LA VIGILANCIA Y MANTENIMIENTO APLICADO AL SISTEMA DE DISPARO DEL REACTOR

S. Martorell, M. Villamizar, J.F. Villanueva.

Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia, España
marville@doctor.upv.es, (*) smartore@iqn.upv.es, jovillo0@iqn.upv.es

1. Resumen

Los equipos pertenecientes a Centrales Nucleares deben cumplir objetivos de fiabilidad y seguridad de funcionamiento; más aún si se trata de equipos pertenecientes a sistemas de seguridad. Las actividades de vigilancia y el plan de mantenimiento que se les asigna tienen un papel decisivo en la consecución, e incluso maximización, de dichos objetivos. En este contexto, el objetivo de la ponencia se centra en presentar el desarrollo de un método, y su aplicación, que permite la optimización integral de la vigilancia y el mantenimiento en base a criterios RAM+C (Reliability, Availability, Maintainability, Cost). El método para obtener el plan de mantenimiento óptimo se plantea como dos problema de optimización mono-objetivo, donde los parámetros asociados al plan actúan como variables de decisión mientras que los parámetros RAM+C intervienen como criterios de decisión, bien como funciones objetivo o como funciones restricción al rango de posible soluciones alternativas. Por ser un problema suficientemente complejo, que no puede ser resuelto con un método analítico, las técnicas heurísticas surgen como una alternativa viable para su resolución. Entre estas, los algoritmos genéticos tienen características que los hacen ideales para este tipo de problemas. La principal es el paralelismo implícito; es decir, la capacidad de realizar la búsqueda en más de un punto a la vez. Por ello, se propone un Algoritmo Genético mono-objetivo como técnica de optimización. Finalmente, se presenta un caso de aplicación centrado en la optimización de pruebas y mantenimientos del Sistema de Disparo del Reactor.

2. Introducción

La presente ponencia se centra en la aplicación de los modelos RAM+C, en la optimización de pruebas y mantenimiento del sistema de disparo del reactor de una central nuclear de tipo PWR, mediante dos modelos de optimización mono-objetivo.

En los modelos de RAM+C se tiene en cuenta el efecto del factor de envejecimiento lineal α , la efectividad, ϵ , y las condiciones de trabajo, $\Psi(z)$, a través de los modelos de mantenimiento imperfecto para el cálculo de la indisponibilidad anual del sistema. Se incluyen los costes de los recursos materiales necesarios en el mantenimiento preventivo y correctivo, en el cálculo de los costes anuales del sistema. Posteriormente, se optimiza bajo criterios de coste e indisponibilidad del sistema, los tiempos entre pruebas y mantenimientos. En particular, se consideran dos problemas de optimización distintos. En el primero, se procede a la optimización de la función riesgo tomando como restricción implícita la función coste, y en el segundo, se optimiza el coste tomando como restricción la función riesgo.

Se plantean por tanto dos problemas de optimización con restricciones implícitas y explícitas del tipo mono objetivo y se resuelven utilizando un algoritmo genético simple objetivo utilizando el software RISKOptimizer 5.5. Finalmente, se presentan los

resultados del caso de aplicación centrado en la optimización de pruebas y mantenimientos del Sistema de Disparo del Reactor.

3. Modelos de indisponibilidad y coste

Indisponibilidad

La indisponibilidad total de un componente normalmente en espera tiene diferentes contribuciones que pueden evaluarse con las siguientes expresiones (CSN-UNESA-UPV, 2001):

La indisponibilidad media asociada a fallos aleatorios, $u_r(\mathbf{x})$:

$$u_r(\mathbf{x}) = \rho + \frac{1}{2} \lambda \cdot T \quad (1)$$

La contribución a la indisponibilidad debida a la duración de la prueba, $u_t(\mathbf{x})$:

$$u_t(\mathbf{x}) = \frac{\tau}{T} \quad (2)$$

La contribución a la indisponibilidad debida a la duración del mantenimiento preventivo, $u_m(\mathbf{x})$:

$$u_m(\mathbf{x}) = \frac{\sigma}{M} \quad (3)$$

La indisponibilidad debida a mantenimiento correctivo, $u_c(\mathbf{x})$:

$$u_c(\mathbf{x}) = \frac{1}{T} \cdot (\rho + \lambda \cdot T) \cdot \mu \quad (4)$$

La indisponibilidad debida al reemplazamiento del equipo, $u_o(\mathbf{x})$:

$$u_o(\mathbf{x}) = \frac{\Gamma}{RP} \quad (5)$$

La indisponibilidad por demanda, $u_d(\mathbf{x})$:

$$u_d(\mathbf{x}) = \rho \quad (6)$$

La indisponibilidad de parada de planta, $u_N(\mathbf{x})$, se representa como:

$$u_N(\mathbf{x}) = f_N d_N \cdot G[AOT] \quad (7)$$

En las expresiones anteriores \mathbf{x} es el vector de variables de decisión. Adicionalmente se tiene:

- ρ Probabilidad de fallo a la demanda,
- λ Tasa de fallo en espera, la cual se modela en función del tipo de mantenimiento imperfecto considerado,
- T Intervalo de pruebas,
- τ Duración media de pruebas,
- σ Duración media de mantenimiento preventivo,
- M Intervalo entre mantenimientos preventivos,
- μ Duración media de la actividad de correctivo,
- Γ Tiempo medio de reemplazamiento,
- RP Periodo de reemplazamiento, y
- f_N Frecuencia de actividades no planificadas.

Además, la tasa de fallo en espera, λ , para componentes reparables se modela en función del tipo de mantenimiento imperfecto considerado. Entre los diferentes modelos de mantenimiento imperfecto existentes (Malik, 1979; Chan et al., 1993; y Martorell et al., 1999a) se han seleccionado los modelos PAR (Proportional Age Reduction) y PAS (Proportional Age Set-Back) propuestos en (Martorell et al., 1999a), modelos que asumen que cada actividad de mantenimiento reduce la edad del componente en función de un parámetro de efectividad. Ambos modelos se diferencian en que mientras en el PAS se reduce una fracción de la edad total del componente; en el modelo PAR, se asume que el mantenimiento reduce sólo una fracción de la edad “ganada” desde el último mantenimiento. Asumiendo un modelo de tasa de fallos lineal, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo, $\Psi(z)$ y mediante un proceso de doble promediación temporal se obtienen las expresiones correspondientes a la tasa de fallos en espera medio, λ , para los modelos PAR y PAS dados, respectivamente por:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\alpha}{2 \cdot f} \cdot (\Psi_{(z)})^2 \cdot [1 + (1 - \varepsilon) \cdot (f \cdot RP - 1)] \quad (8)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\alpha}{2 \cdot f} \cdot (\Psi_{(z)})^2 \cdot \frac{(2 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (9)$$

Siendo, λ_0 la tasa de fallos inicial del componente, RP el período de reemplazamiento, f la frecuencia asociada a cada tarea, α el factor de envejecimiento lineal y ε la efectividad del mantenimiento. Es importante resaltar que la indisponibilidad del sistema se evalúa construyendo su árbol de fallos y con las indisponibilidades de cada componente.

Coste

El objetivo de modelizar el coste es construir modelos que permitan cuantificar adecuadamente la repercusión que las actividades de mantenimiento tienen en la economía de la planta y que posteriormente serán objeto de optimización. En relación a los modelos de costes, se han incluido las siguientes contribuciones:

El coste anual de pruebas $c_t(x)$, está definido por:

$$c_t(x) = 8760 \cdot \frac{c_t}{T} \quad (10)$$

El coste anual de mantenimiento preventivo $c_m(x)$, está definido por:

$$c_m(x) = 8760 \cdot \frac{c_m}{M} \quad (11)$$

El coste anual de mantenimiento correctivo $c_c(x)$, está definido por:

$$c_c(x) = 8760 \cdot \frac{1}{T} \cdot (\rho + \lambda \cdot T) \cdot c_c \quad (12)$$

El coste anual de reemplazamiento de un componente con periodo RP , $c_o(x)$, está definido por:

$$c_o(x) = 8760 \cdot \frac{c_o}{RP} \quad (13)$$

El coste anual por parada de planta $c_D(x)$, está definido por:

$$c_D(x) = 8760 \cdot f_N \cdot (1 - G[AOT]) \cdot c_D \quad (14)$$

Adicionalmente se tiene que:

c_t	Coste de realización de una prueba,
c_m	Coste de realización de un mantenimiento preventivo,
c_c	Coste de realización de un mantenimiento correctivo,
c_o	Coste de realización de un reemplazamiento de un componente,
c_D	Coste de parada de planta, y
f_N	Frecuencia de una actividad no programada.

El coste total del sistema se obtiene sumando las contribuciones de las expresiones (10) a (14) para todos los componentes del sistema.

4. Formulación del problema de optimización mono objetivo

En el proceso de optimización se han tenido en cuenta restricciones explícitas las cuales se imponen directamente sobre los valores que las variables de decisión pueden tomar, y restricciones implícitas que aplican a las funciones objetivo.

Respecto a las restricciones implícitas, las cuales deben ser calculadas inicialmente, se consideran dos problemas distintos. En el primero, se procede a la optimización de la función riesgo tomando como restricción implícita la función coste, y en el segundo, se optimiza el coste tomando como restricción el riesgo. Para ello, inicialmente se calculan los valores de los costes y de la indisponibilidad inicial del sistema como restricción implícita a considerar sobre la función riesgo y coste en cada caso.

Dentro de las restricciones explícitas se encuentran las relativas a la estrategia de pruebas o mantenimientos, donde un conjunto de componentes son agrupados con el fin de que el periodo de pruebas o mantenimientos sea el mismo para todos ellos, así como los tiempos máximos permitidos de inoperabilidad. Cada caso de aplicación tendrá definida las restricciones que se aplican.

Para la cuantificación a nivel de sistema son necesarios los conjuntos mínimos de corte (MCS) del sistema en función de los parámetros de fiabilidad de los componentes que constituyen el sistema de estudio. De este modo derivamos la correspondiente ecuación para el riesgo la cual es aproximada por la media de la indisponibilidad del sistema que viene dada por:

$$U = \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^{o(i)} u_{ij}(T_j, M_j) \quad (15)$$

Como función de coste se adopta el sumatorio de todos los costes individualmente analizados como sigue:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{o(i)} c_{ij}(T_j, M_j) \quad (16)$$

Donde N es el número de MCS deducidos desde el suceso TOP del sistema, o(i) es el orden del i-esimo MCS, $u_{ij}(T_j, M_j)$ es la medida de indisponibilidad del componente j-esimo en el i-esimo MCS, $c_{ij}(T_j, M_j)$ es el coste de las actividades de pruebas y

mantenimientos del componente j-esimo en el i-esimo MCS. Además, T_j representa los valores del intervalo de las pruebas para el componente j-esimo, y M_j el intervalo entre mantenimiento preventivo de dicho componentes j-esimo, que constituyen las variable independiente a optimizar.

5. Caso de aplicación

5.1 Descripción del sistema

La aplicación de esta metodología se ha realizado sobre sistema de disparo del reactor de una central nuclear de tipo PWR. El sistema de protección del reactor vigila las variables de proceso que se relacionan directamente con las limitaciones mecánicas del equipo tales como la presión, el nivel de agua en el presionador, vigilando también las variables que afectan directamente la capacidad de transferencia de calor del reactor (por ejemplo, el caudal y las temperaturas del refrigerante del reactor). Finalmente, el sistema de disparo del reactor se encuentra normalmente en espera y está constituido por múltiples componentes según se muestra en el esquema simplificado mostrado en la Figura 1.

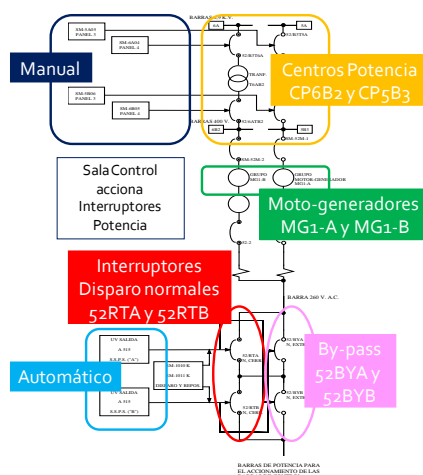


Figura 1. Esquema simplificado del sistema de Disparo del Reactor.

5.2 Método de resolución

Como se menciona anteriormente, se consideran dos problemas distintos. En el primero, se procede a la optimización de la función de la indisponibilidad tomando como restricción implícita la función coste, y en el segundo, se optimiza el coste tomando como restricción la indisponibilidad. Se plantean por tanto dos problemas mono objetivo y se resuelven utilizando un algoritmo genético. Se utilizó la rutina de algoritmos genéticos del software RISKOptimizer 5.5.

El primer paso, antes de proceder al proceso de optimización, consiste en calcular la indisponibilidad del sistema y el coste anual inicial, las cuales se consideraran como restricciones implícitas. Determinadas las restricciones implícitas se establecen posteriormente las restricciones explícitas.

Restricciones implícitas impuestas

• Indisponibilidad del sistema

En la Tabla 1, se presentan los datos necesarios en el cálculo de la indisponibilidad del sistema teniendo en cuenta que:

- Las especificaciones técnicas de funcionamiento del sistema de disparo del reactor establecen los intervalos entre pruebas (STI) y tiempos máximos de inoperatividad (AOT).
- Los intervalos de mantenimiento preventivo para el sistema de disparo del reactor, estos se establecieron teniendo en cuenta tres tareas de mantenimiento preventivo, la primera de ellas aplica a los interruptores de disparo 52/RTA y 52/RTB, la segunda aplica a los relés (SHUNT, STA y UV) y la tercera aplica a los Fusibles asociados a los relés Shunt.
- En el caso de aplicación se incluye el efecto del factor de envejecimiento lineal, la efectividad ε , y las condiciones de trabajo, $\psi_{(z)}$, a través de los modelos de mantenimiento imperfecto para el cálculo de la indisponibilidad anual del sistema, como incertidumbres de modelo. Se ha considerado que el modelo de envejecimiento que mejor se adapta al comportamiento de los Interruptores de disparo y de los relés, es un modelo de edad PAS. En ambos casos las condiciones operacionales y ambientales del equipo han sido consideradas normales y la efectividad del mantenimiento igual a 1. (UPV-IN-006, 2000; Levy, I.S et al., 1988).

COMPONENTE	STI (hr)		AOT (hr)	Mantenimientos (hr)		Parámetros indisponibilidad	
						λ_0 [1/h]	α
Interruptor de Disparo (52/RTA y 52/RTB) Interruptor de By pass (PRUEBAS INT. RX) Interruptor de potencia	T^1	1440	48	M^1	12960	$8.41 \cdot 10^{-7}$	$1.83 \cdot 10^{-12}$
Relés (SHUNT, STA y UV)	T^2	1440	48	M^2	12960	$3.69 \cdot 10^{-7}$	$1.04 \cdot 10^{-11}$
FUSIBLES (1,2,5,6) asociado a los RELE SHUNT	T^3	1440	48	M^3	12960	$2.66 \cdot 10^{-6}$	-
Modulo control lógico (A515 TREN A y A515 TREN B)	T^4	1440	48	-	-	$9.21 \cdot 10^{-7}$	-
Conmutador Manual (SM-5A05S y SM-6A04S)	T^{5a}	13140	48	-	-	$7.40 \cdot 10^{-8}$	-
Conmutador Manual (SM-5B06S y SM-6B05S)	T^{5b}	26280	48	-	-	$7.40 \cdot 10^{-8}$	-
Inserción mecanismos ACC barras de control	T^6	2160	48	-	-	$4.32 \cdot 10^{-9}$	-

Tabla 1. Parámetros necesarios en el cálculo de indisponibilidad del sistema

Se cuantifica la indisponibilidad del sistema con la Ecuación (15), utilizando los resultados del desarrollo del árbol de fallos del sistema del que se han obtenido los conjuntos mínimos de corte (MCS) para a un nivel de truncación 10^{-12} y asignando los parámetros de fiabilidad de la Tabla 1, en cada una de las contribuciones a la indisponibilidad utilizando los modelos presentados en la sección 3. La indisponibilidad inicial del sistema de disparo del reactor se evalúa como $U_{\text{inicial}} = 7.1488 \cdot 10^{-6}$.

• Coste anual inicial del sistema

Respecto al coste anual del sistema, éste se calculó teniendo en cuenta la agrupación de los componentes presentados en la Tabla 1, y los modelos de coste presentados en la sección 3. En la Tabla 2 se presentan los costes anuales del sistema de disparo

del reactor asociados a la estrategia actual de pruebas y mantenimiento para cada componente y tipo de actividad considerada.

COMPONENTE	COSTE ANUAL PRUEBAS	COSTE ANUAL MANTENIMIENTOS	COSTE ANUAL CORRECTIVOS	COSTE PARADA DE PLANTA	COSTE TOTAL ANUAL POR COMPONENTE
Interruptor de Disparo (52/RTA y 52/RTB) Interruptor de By pass e Interruptores de Potencia	6375.42	595.63	28.36	161.59	7161
Relés (SHUNT, STA y UV)	1507.28	164.79	8.29	0.43	1680.79
Fusibles (1,2,5,6) asociado a los Relé SHUNT	121.67	13.52	5.33	0.00	140.51
Modulo control logico (A515 TREN A y A515 TREN B)	121.67	0.00	0.32	0.00	121.99
Conmutador Manual (SM-5A05S y SM-6A04S)	26.67	0.00	0.03	0.00	26.69
Conmutador Manual (SM-5B06S y SM-6B05S)	13.33	0.00	0.03	0.00	13.36
Inserción mecanismos ACC barras de control	81.11	0.00	0.00	0.00	81.11
COSTE TOTAL ANUAL DEL SISTEMA, C(x)					9225.45

Tabla 2. Costes asociados a las agrupaciones por componentes.

Restricciones explícitas

Teniendo en cuenta la agrupación presentada en la Tabla 1 se le imponen las siguientes restricciones explícitas:

- 1) Los intervalos deben ser números enteros múltiplos de 24 hrs.
- 2) Existe una relación entre los intervalos de pruebas de dos grupos: Conmutador Manual (SM-5A05S y SM-6A04S) y Conmutador Manual (SM-5B05S y SM-6B04S). Dicha relación está definida por: $T^{5b} = K_1 T^{5a}$
- 3) El intervalo entre pruebas para el fallo de causa común 1IKPR0BRKL está definido como la mitad del tiempo entre pruebas de grupo T^1 , Interruptor de Disparo y By pass (52/RTA y 52/RTB). Relación definida por: $K_2 = T^1 / T_{1IKPR0BRKL}$

En la Tabla 3 se resume las restricciones para los intervalos de las diferentes estrategias de pruebas y mantenimientos preventivos, estableciendo valores mínimo y máximo del periodo entre pruebas y mantenimientos preventivos.

COMPONENTE	STI	Relación	Rango Permitido
Interruptor de Disparo (52/RTA y 52/RTB) Interruptor de By pass y Interruptores de Potencia	T^1	$K_2 = T^1 / T_{1IKPR0BRKL}$	$168 < T^1 < 2160$
			$1 < K_2 < 3$
Relés (SHUNT, STA y UV)	T^2	-	$168 < T^2 < 2160$
Fusibles (1,2,5,6) asociado a los Relé SHUNT	T^3	-	$168 < T^3 < 2160$
Modulo control lógico (A515 TREN A y A515 TREN B)	T^4	-	$168 < T^4 < 2160$
Conmutador Manual (SM-5A05S y SM-6A04S)	T^{5a}	-	$4320 < T^5 < 8640$
Conmutador Manual (SM-5B06S y SM-6B05S)	T^{5b}	$T^{5b} = K_1 \cdot T^{5a}$	$1 < K_1 < 5$
Inserción mecanismos ACC barras de control	T^6	-	$720 < T^6 < 8640$
COMPONENTE	MP	Relación	Rango Permitido
Interruptor de Disparo (52/RTA y 52/RTB)	M^1	-	$8640 < M^1 < 17280$
Relés (SHUNT, STA y UV)	M^2	-	$8640 < M^2 < 17280$
Fusibles (1,2,5,6) asociado a los Relé SHUNT	M^3	-	$8640 < M^3 < 17280$

Tabla 3. Restricciones sobre los intervalos de pruebas y mantenimientos.

5.3 Resultados y discusión

Se presentan en la Tabla 4 los resultados de las dos optimizaciones mono objetivo: en el que se busca minimizar la indisponibilidad con restricción de coste y en la que se busca minimizar el coste con restricción de indisponibilidad.

COMPONENTES	Variable	Valores iniciales	Valores optimizados minimizar la indisponibilidad con restricción de coste	Valores optimizados minimizar el coste con restricción en la indisponibilidad
Interruptor de Disparo (52/RTA y 52/RTB) Interruptor de By pass y Interruptores de Potencia	T^1	1440	1416	2112
Relés (SHUNT, STA y UV)	T^2	1440	1512	2040
Fusibles (1,2,5,6) asociado a los Relé SHUNT	T^3	1440	1680	2160
Modulo control logico (A515 TREN A y A515 TREN B)	T^4	1440	2160	2160
Conmutador Manual (SM-5A05S y SM-6A04S)	T^{5a}	26280	8592	8640
Inserción mecanismos ACC barras de control	T^6	2160	720	1586
Conmutador Manual (SM-5B06S y SM-6B05S)	K_1	2	5	4
Suceso Fallo de Causa Común 1IKPR0BRKL	K_2	2	2.95	2
Interruptor de Disparo (52/RTA y 52/RTB)	M^1	12960	16680	17280
Relés (SHUNT, STA y UV)	M^2	12960	15672	17280
Fusibles (1,2,5,6) asociado a los Relé SHUNT	M^3	12960	9408	17280
$U(x)$	-	$7.1488 \cdot 10^{-6}$	$3.2226 \cdot 10^{-6}$	$7.094 \cdot 10^{-6}$
$C(x)$	-	9225.45	9219.87	6517.1334

Tabla 4. Tiempo entre pruebas y mantenimientos optimas para cada agrupación de componentes.

La Figura 2 presenta de forma grafica los resultados obtenidos tras las optimizaciones modo objetivo.

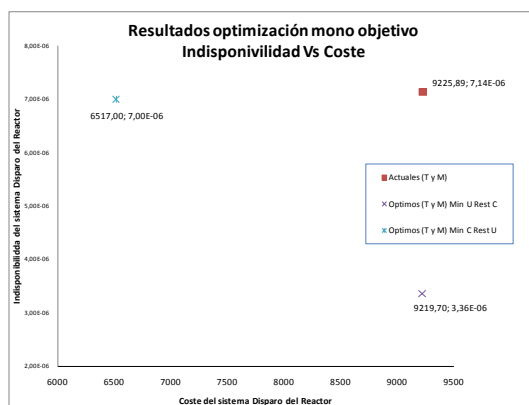


Figura 2. Resultados de la optimización.

Mediante el uso de algoritmos genéticos se ha obtenido para cada caso una solución factible, a partir de las cuales el analista puede seleccionar la solución final.

Agradecimientos

El trabajo presentado forma parte del proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, ENE2010-17449.

Conclusiones

La planificación de las pruebas y mantenimiento en CCNN es una actividad de gran importancia dada su repercusión en la seguridad de las mismas. En esta ponencia, se presenta la optimización de las pruebas y el mantenimiento del sistema de disparo del reactor utilizando como método de optimización los algoritmos genéticos teniendo en cuenta restricciones implícitas y explícitas. Considerando como restricciones implícitas la Indisponibilidad y el Coste inicial del sistema de disparo del reactor, las cuales son evaluadas utilizando los modelos presentados en las secciones 3 y 4, y como restricciones explícitas las relativas a la estrategia de pruebas o mantenimientos. Se han desarrollado dos modelos de optimización mono-objetivo, primero se presenta la optimización de la función riesgo tomando como restricción implícita la función coste, y en el segundo, se optimiza el coste tomando como restricción la función riesgo, siendo las variables de decisión consideradas los intervalos de pruebas y mantenimiento. Mediante el uso de algoritmos genéticos se ha obtenido para cada caso una solución factible, a partir de las cuales el analista puede seleccionar la solución final.

Referencias

Chan, J. & Shaw, L. Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*; 42(4), 566–571. 1993.

CSN-UNESA-UPV. Guía de Procedimientos de Aplicación del APS en el Análisis de Cambios de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) Informados en el Riesgo. Edición 4. Abril. 2001.

Levy, I.S., Wreathall, J., DeMoss, G., Wolford, A., Collins, E.P. & Jarrell, D.B. Priorization of TIRGALEX – Recommended Components for Further Aging Research, NUREG/CR-5248, PNL-6701 R9, 1988.

Malik MAK. Reliable preventive maintenance scheduling. *AIIE Transactions*, 11; 221–228. 1979.

Martorell, S., Sánchez, A., Carlos, S. & Serradell, V. [2003]. “Alternatives and challenges in optimizing industrial safety using genetic algorithms”, *Reliability Engineering and System Safety* 86, 25–38, 2003.

Martorell, S., Muñoz, A., Serradell V. [1995]. An approach to integrating surveillance and maintenance tasks to prevent the dominant failure causes of critical components. *Reliability engineering and systema safety*, Vol. 50, 179-187.

Martorell S, Sanchez A, Serradell V. [1999a]. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 64(1):19-31

Martorell, S., Villanueva, J. F., Carlos, S., Nebot, Y., Sánchez, A., Pitarch J. L. and Serradell, V. [2005a]. RAMS+C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms. *Reliability Engineering & System Safety*; 87(1):65-75.

Martorell, S., Carlos, S., Sanchez, A. [2005b]. Use of metrics with multi-objective GA. Application to the selection of an optimal maintenance strategy in the RCM context. In *Proceedings of European Safety and Reliability Conference ESREL [2005]*. Ed. Taylor & Francis Group, pp 1357-1362.

@RISK 5.5. Risk Analysis and Simulation Add- In for Microsoft Excel, Palisade Corporation. Version 5.5. May 2009

@RiskOptimizer. Simulation Optimization for Microsoft Excel, Version 5.5, May, 2009.